

Morphological Study of Plesiosaurs Based on Hydrodynamic Experiments

著者	望月 直
number	55
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	理博第2657号
URL	http://hdl.handle.net/10097/56815

氏名・（本籍）	もちづきすなお 望月直
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	理博第2657号
学位授与年月日	平成23年9月8日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）地学専攻
学位論文題目	Morphological Study of Plesiosaurs Based on Hydrodynamic Experiments (流体力学実験に基づく長頸竜類の形態学的研究)
論文審査委員	(主査) 教授 西 弘 嗣 (学術資源研究公開センター) 教授 長 濱 裕 幸 准教授 中 村 昌 彦 (九州大学応用力学研究所) 准教授 高 嶋 礼 詩 (学術資源研究公開センター)

論文目次

Abstract	i
Preface and Acknowledgement	iii
Contents	iv
Nomenclature	vi
1. Introduction	1
1-1. Backgrounds	1
1-1-1. Phylogeny, stratigraphy, geography	1
1-1-2. Morphology	3
1-1-3. Aquatic adaptation	4
1-1-4. Hypothesis about swimming behaviors of plesiosaurs	4
1-2. Problems on evaluating swimming performance	6
1-2-1. Swimming performance	6
1-2-2. Problems and Solutions	7
1-3. Objectives and approaches	7
2. Theoretical model of plesiosaurs	8
2-1 Geometric model of a plesiosaur	8
2-2. Kinematic model	11
2-2-1. Reference frames	11
2-2-2. Motion equation	13
3. Static experiments	16

3-1. Measuring principle	16
3-1-1. Captive model test	16
3-1-2. Static experiments	18
3-2. Experimental set-up	20
3-2-1. Solid model	20
3-2-2. Tank and towing apparatus	22
3-2-3. Data acquisition system	23
3-2-4. Physical parameters	24
3-2-5. Operation and data analysis	24
3-3. Results	25
3-3-1. Model L	25
3-3-2. Model M	34
3-3-3. Model S	39
3-4. Discussion	45
3-4-1. Static stability	45
3-4-2. Interaction between fore and aft fins	46
3-5. Summary	49
4. Dynamic experiments	50
4-1. Measuring principle	50
4-1-1. Heave test	51
4-1-2. Pitch test	53
4-2. Experimental set-up	57
4-2-1. Instruments	57
4-2-2. Physical parameters	59
4-2-3. Operation and analysis	59
4-3. Results	61
4-3-1. Heave test	61
4-3-2. Pitch test	67
4-4. Summary	71
5. Discussion	72
5-1. Morphological reconstruction of flippers	72
5-2. Body proportion and static stability	73
5-2-1. Effect of the long neck	73
5-2-2. Effect of the flipper size	76
5-3. Usage of each limb	78
6. Conclusion	79
References	81

論文内容要旨

エラスモサウルス科 (Elasmosauridae Cope, 1870) は、長頸竜類 (Plesiosauria de Blainville, 1835) に属する単系統群で、白亜紀に生息した海生爬虫類の一群である。この動物は、頸および体全体が長く、四肢が板状である特徴をもつ。エラスモサウルス類が水中を泳いでいたことには疑いなく、四肢を翼として用いて羽ばたきや水中での滑空を行ったと考えられる。一般に、運動の安定性や機動性といった遊泳性能は、生物の体に周囲からどのような大きさと向きの力が作用するかによって決まる。しかし、エラスモサウルス類の頸や尾、前鰭や後鰭といった各部位にどのような力が作用していたか、その結果として、彼らがどのような遊泳運動をしていたかは、流体力学的な根拠に乏しく不明なままであった。

流体中を移動する物体に及ぶ力学的な影響を評価する実験手法は、主に船舶工学や航空工学の分野で開発され、船舶や航空機を設計するのに使用されている。この工学的な解析手法は現生生物にも適用され、遊泳や飛行のメカニズムの解明にも用いられている。同様に、この手法は絶滅した動物にも適用できる。現生のサメ類と中生代の魚竜類にみられるような形態の収斂現象をみると、水棲の大型脊椎動物の体型は遊泳性能と密接に関連していると考えられる。したがって、長頸竜類の遊泳性能が何によって決定されるかを明らかにすることは、水棲動物の進化に重要な手がかりを与えてくれる。本研究では、遊泳中の長頸竜に周囲からどのような力が作用するかを模型実験により測定し、その運動力学的な性質に基づき、長頸竜類がどのように泳いでいたかを考察することを目的とした。また、実験の結果を踏まえ、遊泳性能と形態進化との関連を議論した。

本研究では、長頸竜の体に作用する流体力を曳航試験により測定した。この手法は、長頸竜の体型を模した模型を水槽中で曳航し、模型に作用する流体力を測定するものである。測定試験に用いた模型は、エラスモサウルス類の中でも特に頸が長い *Hydrotherosaurus alexandrae* Welles, 1943 の骨格化石を参考にしたもので、細長い胴体と前後に並んだ 2 対の水平翼から構成される。縮尺は 1/4 であり、模型の長さは 2.1 m、胴体の最大直径は 0.23 m、翼の幅は 0.88 m である。また、模型の浮心および重心は前翼の基部付近に位置する。さらに、四肢に関しては、翼幅と翼厚が等しく翼弦長のみが異なる 3 種類の模型を用意した。その翼厚比 (翼厚/翼弦長) はそれぞれ 0.12, 0.20, 0.33 で、それぞれ模型 L, M, S と名付けた。なお、模型 S の翼の寸法は、四肢の形状をその骨格の外形に沿って復元し、それ以外の翼は軟体部を考慮して後縁部をやや大きめに設計したものである。これらの翼の仰角は前後とも $\pm 30^\circ$ の範囲で変更できるようにした。試験では、流体から模型に作用する力の 3 成分とモーメントの 3 成分を測定した。

一連の曳航試験は、静的試験と強制動揺試験からなる。静的試験では、模型を等速度で運動させ、模型に作用する力を測定するとともに、流体力の作用点である圧力中心を計算し、運動の静安定性を検討した。この試験では、速さ、体の迎角と横滑り角、さらに翼の迎角からなる条件を変えて測定を行った。なお、模型の前進速度は現生脊椎動物の遊泳速度を参考に 0.1~2.0 m/s の範囲に設定した。強制動揺試験では、模型を前進させるとともに体全体を上下方向に、または頭を上下方向に振るよう縦方向に振動させた。この試験では前進速度、振動の周期と振幅を変化させた。強制動揺試験では、作用する力に基づき、付加質量や付加慣性モーメントも計算した。これらの試験は九州大学応用力学研究所・深海機器力学実験水槽で行った。

前進速度と翼の迎角を変えた静的試験の結果から、模型 L/M と模型 S では遊泳時の性能が大きく異なることがわかった。模型 L/M に作用する揚力は翼の迎角に比例し、模型全体に作用する抗力に対し翼に生じる揚力 (揚抗比) は 3 から 6 程度であった。一方、S 型復元の翼に作用した揚力は迎角には比例せず、揚抗比も 1 程度と小さく、翼としての性能はよくない。なお、いずれの模型についても、前後どちらか一

方の翼の迎角のみを変えた場合、圧力中心は翼の前縁から翼弦長の $1/4$ だけ後方に位置する基線 ($1/4$ 翼弦線) の付近に位置した。これらの結果から、模型 L/M の方が模型 S よりも運動の速さや方向をはるかに制御しやすかったと考えられる。

模型 L/M では、体の迎角と横滑り角を変更した静的試験も行った。縦運動の際の圧力中心は前翼と後翼の間、すなわち重心より後方に位置し、流体力は迎角を減少させる向きに作用した。つまり、縦運動は静安定であった。これに対し、横運動の際の圧力中心は重心の前方に位置し、静安定ではなかった。これらの結果から、長頸竜は縦方向の運動のぶれを自然に解消して直進できたこと、縦方向の急な方向転換には向かなかったこと、その一方で横方向には比較的動きやすかったことが示唆される。

強制動揺試験は、模型 M についてのみ行った。上下揺れに関する付加質量は、静止時には模型の質量の 1.5 倍、縦揺れに関する付加慣性モーメントは模型の慣性モーメントの 1.1 倍であった。いずれの量も前進時には $0.70 \sim 0.75$ 倍程度に減少した。この試験では揚力や抗力も測定したが、その大きさは静的試験で得られた値の $0.70 \sim 0.95$ 倍であった。この結果から、静止時や低速時よりも高速度で前進している時のほうが方向転換し易いという傾向が明らかになった。

長頸竜類は種類ごとに体型が異なることから、その形態と遊泳性能の関係を考察した。本実験の結果に基づくと、長頸竜の遊泳運動の静安定性は、次の二つの要因で決まると推定できる。第一の要因は頸の長さで、これにより遊泳時の圧力中心と重心の位置関係が決定される。長頸竜の重心はおよそ前肢と後肢の間にあって、頸が長い種類ほど前肢寄りとなる。一方、実験で示したように縦運動時の圧力中心は、常に四肢の近傍にある。したがって、頸が長い種類ほど縦運動は安定的あり、逆に短い種類ほど縦運動を機敏に変えることができたと推定される。第二の要因は、前肢と後肢のサイズである。前後の肢と重心の位置関係に基づくと、前肢は圧力中心を重心の前方に、後肢は重心より後寄りに近づける効果がある。つまり、頸の長さが一定であれば前肢が小さいか後肢が大きい種類ほど、その運動は安定的となる。

長頸竜の形態は、遊泳時に有利になるように収斂進化したと予想される。これまでの化石の研究によると、長頸竜の頸の長さと上腕骨の長さには正の相関があることが知られており、頸が短く前肢が大きい形態や、頸が長く前肢が小さい形態をしたものはほとんどいない。本実験から示唆される形態と遊泳性能の関係から、長頸竜の体型は縦運動の静安定性に制約されて収斂していたことが示唆される。

前後の四肢と重心との位置関係に基づくと、遊泳運動における前肢と後肢の用途は異なっていたと予想される。水平方向に広げられた後肢には受動的に縦運動を一定に保つ作用があるため、固定翼として作用した可能性が高い。一方、前肢は後肢とは異なり、その動きを能動的に制御し、姿勢を俊敏に変化させることに寄与していた。長頸竜類は水中滑空だけでなく羽ばたきもしたと考えられるが、この運動は前肢が担っていた可能性が高い。

本研究は、流体力学実験が長頸竜類のような絶滅生物の遊泳性能を評価することに有効で、その形態と運動性能の関係について重要な情報をもたらすことを示唆した。従来、絶滅脊椎動物の復元は解剖学的知見に基づき、化石として残る骨格に筋肉などをつけることでなされていた。しかし、生物の遊泳は周囲の流体の動きに強く制約されるので、その力学的性能を検討することで、その動物の外形を直接的に推定することができる。加えて、このような実験により明らかにされる流体力学的制約から、大型水棲動物の形態進化に対する強い淘汰圧の推定にも役立てられる。

論文審査の結果の要旨

長頸竜類は、白亜紀に生息した海生爬虫類で、頸が長く、板状の四肢をもつ絶滅した生物である。そのため、どのように泳いでいたかは謎であった。そこで、本研究では長頸竜の模型を作って曳航試験を行い、遊泳時にどのような流体力が作用しているかを測定し、形態と遊泳能力の関係を考察した。

試験に用いた模型は、頸が長い *Hydrotherosaurus alexandrae* の骨格化石を基に 1/4 縮尺（全長 2.1 m）で設計した。4 つの鰭は水平翼とし、3 種類（L, M, S 型）を用意した。S 型は、骨格の外形をそのまま復元した鰭で、L 型と M 型は後縁に軟組織をつけ大きめに復元した鰭である。これらの鰭は 30° の角度をつけられるようにした。本研究では、静的曳航試験と強制動揺曳航試験を九州大学応用力学研究所・深海機器力学実験水槽で行った。

実験の結果、S 型の四肢は L/M 型と比べて姿勢制御の効率がよくないことがわかった。したがって、この首長竜の復元には S 型の鰭は不適切である。L/M 型の場合、縦運動は静安定で、横運動で静安定ではなかった。これは横方向には動きやすかったことを示唆する。上下揺れに関しても、付加質量と付加慣性モーメントはいずれも前進時には減少するので、静止時よりも前進時に方向転換がより容易となることも明らかになった。

さらに、本研究では、実験の結果から一般的な長頸竜の進化に関しても議論した。本研究の結果から、頸が長い種類ほど縦運動に対して安定しており、短い種類ほど縦運動を機敏に変えることができたと推定される。また、頸の長さが一定であれば後肢が前肢より大きい種類ほど、その縦運動は安定的であった。

このように、本研究は首長竜という絶滅生物の遊泳能力を工学的な実験で明らかにし、古生態学に応用しようとする世界でも初めての試みである。流体力学実験の結果から、生物の遊泳能力を力学的に議論し、首長竜の遊泳形式やその古生態学的な復元に寄与する多くの知見を明らかにした。これにより、この絶滅生物群の形態学的な収斂に関しても新しい仮説を提案することができ、古生物学、進化学に対して貢献するところ大なるものがある。これらの成果は、自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって、望月直君提出の博士論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。